資料４ －３

スターダストプログラム
「小型衛星コンステレーション関連要素技術開発」
②軌道姿勢制御技術の開発

成果報告

令和8年11月17日

株式会社ジェネシア

本事業の背景と目的

近年、大量の小型衛星を一体的に運用し、衛星データ量の増加と新たな付加価値の創造を目指す「小型衛星コンステレーション」を構築しようとする動きが活発化しており、宇宙産業のゲームチェンジが起こりつつある。また、宇宙基本計画においても、我が国の宇宙活動の自立性、競争力確保の観点から重要性が示されている。

部品・コンポーネント等の先端的な基盤技術を開発していくことが喫緊の課題であり、中小・ベンチャーを含む産業界と、国やその研究機関が連携し、戦略的にニーズや出口を見据えた技術開発に取り組んでいくことが必要である。

上記状況を踏まえ、我が国の宇宙活動の自立性及び国際競争力確保の観点から、「①推進系技術の研究開発」、「②軌道・姿勢制御技術の研究開発」、「③電源系技術の研究開発」、「④衛星の高性能化に伴う設計課題に係るフィージビリティスタディ」が小型衛星に関連した戦略的に注力すべき重点技術とされており、本事業においては４つの技術要素のうち「**②軌道・姿勢制御技術の研究開発・実証**」を行う。

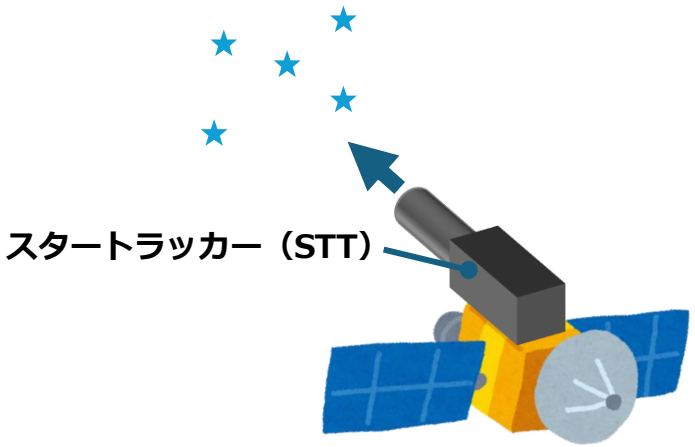
スタートラッカー（以下、STT：Star Tracking Telescope ）

本事業の背景と目的（続き）

株式会社ジェネシア（幹事法人）と東京工業大学（現・東京科学大学）及び東北大学によって構成されたコンソーシアム（以下、コンソーシアム全体を総称して「事業実施者」という。）は、小型衛星の搭載に適する国産の小型・高性能・安価な、**スタートラッカー**の開発を、2020 年4 月より自主事業として実施してきた。

令和２- ４ 年度補正事業（以下、「本事業」という。）は、当該自主事業を発展的に継承するものとなっている。

STTは人工衛星等が宇宙軌道において、どの方向に向いているかを検知する機能を持った専用望遠鏡のことである。STTは、その視野内に捉えられた恒星の画像を、内蔵された星配置カタログと照合することにより宇宙機の姿勢決定を行うものである。



恒星カタログと、取得した恒星の
幾何的な配置情報とをマッチング

人工衛星本体の姿勢情報に変換
（STTは人工衛星の姿勢検出センサ）

実施成果のサマリ

既に完成済のスタートラッカーは、全長15 cm程度のコンパクトなサイズに光学系（バッフル含む）及び電気系の全てが実装され、東京工業大学開発の50kg級技術実証衛星「ひばり」に搭載され、2021年11 月にJAXA革新2号機で打ち上げられて以降、軌道上からさまざまな情報を送り届けている。

本委託事業の実施者は、本事業にてSTTの更なる

① 多機能化、

② 高性能化、

③ 高信頼化 を実現し、

世界市場における圧倒的な技術優越性を強固にするとともに、

量産機として国内外の需要者に対して

④ 安定供給できる技術体系・体制を構築 し、

衛星質量クラス・予算規模に合わせたラインナップを確立、つまり、

⑤ 国際競争力の強化に対する取組み をした。

実施成果のサマリ（続き）

開発テーマの一覧

① 多機能化

1-1） アライメントキューブの開発
1-2） 画像出力機能及び突発天体等の座標出力機能
1-3） ジャイロセンサの情報、衛星の高速旋回情報との連動
1-4） 発展型STTに求められる機能要素に関する概念検討
1-5） 技術情報の開示ルールの検討

② 高性能化

2-1） 恒星カタログの改良
2-2） マッチングアルゴリズムの改良
2-3） 撮像素子とFPGAの冷却
2-4） 消費電力削減
2-5） 太陽離隔・地球離隔の縮小Ⅰ 特殊なバッフルの開発
2-6） 太陽離隔・地球離隔の縮小Ⅱ 改良型アルゴリズムの開発
2-7） 光学レンズの長焦点化
2-8） CubeSatへの適合性向上

③ 高信頼化

3-1） 放射線耐性の向上
3-2） 衝撃試験、振動試験評価
3-3） 自動アライメントシステムの製作
3-4） 恒星シミュレータの製作、性能評価
3-5） 太陽シミュレータの製作、性能評価
3-6） 歪曲収差の実測検証
3-7） SiLSエミュレータの開発
3-8） HiLSエミュレータの開発

④ 安定供給できる技術体系、体制の確立

4-1） 専用梱包ケースの整備
4-2） 取扱説明書、ドキュメント類の整備

⑤ 低コスト化への取組み

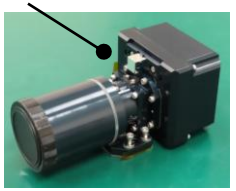
5-1） 市場調査および情報展開、売り込みの強化
5-2） 製造コスト低減への取り組み

実施成果の詳細

①：多機能化（1ページ目 / 4ページ中）

「多機能化」とはスタートラッカーに実装された機能の多様性の追加のことをいう。

- **アライメントキューブの開発**
  - 人工衛星にスタートラッカーを取付ける際、衛星とスタートラッカーとのアライメントを確保できるよう、専用のアライメントキューブを開発した。また、センサ座標とのミスアライメント計測技術、環境を構築した。衛星に搭載した後の地上でのミスアライメント計測においては、衛星構造に対するセンサ搭載角度に応じて、センサに対するアライメントキューブの要求固定姿勢が異なる。この点にも考慮し、ユーザーの要求に柔軟に対応できる設計を実現した。



アライメントキューブのスタートラッカーへの取り付け姿

- **画像出力機能及び突発天体等の座標出力機能の追加（次のページに続く）**
  - スタートラッカーは姿勢座標を出力するための画像取得を高頻度で実行しているが、通常はそこに写し込まれた光点の幾何的関係等を解析した結果としての姿勢関連情報のみが出力される。しかし、姿勢情報と関連づけられた原画像には、恒星カタログには含まれない光点が映り込んでいることがある。例えば、軌道上で検出されるそれらの光点は、ガンマ線バーストや超新星などの突発天体の発生を示唆している場合や、彗星や小惑星などの移動天体を検出している場合、更に別の移動物体等の可能性がある。
  - 突発天体や移動物体の座標を抽出してレポートする機能を実時間運用できるようにスタートラッカーを発展させることが可能であり、そうすることは科学的その他において意義深い。またこれら光点を適切に検出し、姿勢決定データから取り除くことは、スタートラッカーの基本機能である姿勢決定精度の向上に資する。
  - 上記機能の実現に向けて以下の4テーマに取り組んだ。

    a：既存スタートラッカーの画像統計調査
    b：突発光点の座標レポート機能の追加
    c：地上からの天空撮像による、突発光点の座標出力機能の試験運用
    d：レポート機能の性能評価

実施成果の詳細

①：多機能化（2ページ目 / 4ページ中）

「多機能化」とはスタートラッカーに実装された機能の多様性の追加のことをいう。

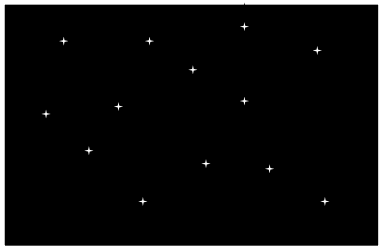
- **画像出力機能及び突発天体等の出現座標出力機能の追加（前ページからの続き、次ページに続く）**

a：既存スタートラッカーの画像統計調査

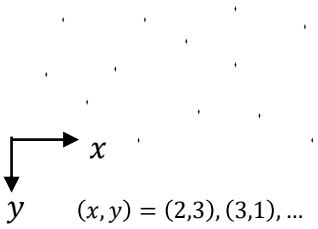
- 軌道上で取得した実画像データを用いて、軌道上でのデブリの観測頻度を統計的に求めた。突発光点の検出に係るコマンドを、地上検証用ソフトに実装した。本開発において、スタートラッカーがレポートした光源座標が妥当に検出・出力されているかを検証するためには、通常の取得画像をそのままスタートラッカーの外部に読み出す必要がある。そのための機能を実現するため、カメラリンク・インターフェースを介して画像を出力できるよう制御基板の改良設計及び製造を実施して試験に供した。

b：突発光点の座標レポート機能の追加

- 取得画像の出力機能や検出した光点の座標をバイナリデータで出力する機能を追加した結果、以下を実現することが可能となった。
  - 画像情報からセンサ劣化を確認することが可能となり、パラメータの微調整も実現できることとなった。
  - 光点座標情報をデータ量が小さなバイナリデータに変換できることから、データのダウンリンクが容易になった。



白黒画像データで取得



光源の座標をバイナリデータに変換



衛星の姿勢制御コンピュータに接続し、画像撮像，点源座標データを送信する模擬試験の様子

実施成果の詳細

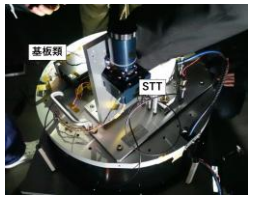
①：多機能化（3ページ目 / 4ページ中）

「多機能化」とはスタートラッカーに実装された機能の多様性の追加のことをいう。

- **画像出力機能及び突発天体等の出現座標出力機能の追加（前ページからの続き）**

  c：地上からの天空撮像による、突発光点の座標出力機能の試験運用

  - スタートラッカーを治具に搭載し天空を撮像。この実機試験により光点の座標出力機能が正しく動作することを確認できた。また、衛星搭載予定の基板類を使用し軌道上における画像読み出しを模擬した動作確認に成功。



実機試験時の様子

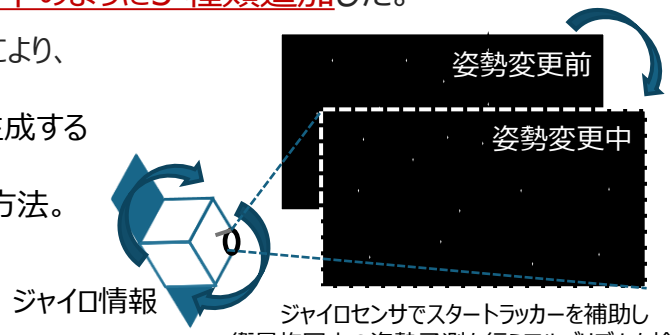
  d：レポート機能の性能評価

  - 軌道上データ等との比較により、光点データのレポート機能の性能評価を行った。このレポート機能の目的は軌道上からの移動物体の検出であり、物体をどの程度の確率で検知可能かを評価した。また、軌道上からどの程度のサイズの物体を検知可能かについても定量的に評価を実施した。

- **ジャイロセンサの情報、あるいは衛星の高速旋回情報をスタートラッカーに連動させる機能の追加**

  - スタートラッカーの星探索アルゴリズムに、ジャイロセンサの情報を加味する機能、あるいは前回、前々回の測位結果から現在の指向方向予測を行う機能を以下のように3 種類追加した。

1. 前回、前々回分の撮像測位情報からの時間発展により、現在位置を推定する方法。
2. MEMSジャイロ、磁気センサおよび太陽センサ等が生成する姿勢関連情報などの外部情報を連動させる方法、若しくはMEMSジャイロをスタートラッカーに実装する方法。
3. スタートラッカー処理系にカルマンフィルタを実装し、上記方法と連携させる方法。



ジャイロセンサでスタートラッカーを補助し
衛星旋回中の姿勢予測を行うアルゴリズムを検証


実機で定量的に評価

実施成果の詳細

①：多機能化（4ページ目 / 4ページ中）

「多機能化」とはスタートラッカーに実装された機能の多様性の追加のことをいう。

- **発展型スタートラッカーに求められる機能要素に関する概念検討**
  - いつ、どこで、どの方位を指向しているかの情報と連動しスタートラッカーが星を探索する、というコンセプトが実現すれば、星の識別速度を毀損することなく、姿勢決定精度を向上させ得ると期待できる。このようにして小型衛星においても一層高い指向精度と高度な安定性を実現できるようになると、ミッション撮像系に対してより長時間の露光モードを提供できるようになる。その結果、地表面に対する狭波長帯域分光撮像において光子統計を高める（S/Nを向上させる）ことができるようになる他、超解像を利用したNEO検出などを想定することができる。
  - 天体のエフェメリスの内蔵が実現した場合、例えばセンサ視野が近傍の天体（地球、月、太陽等）に近づいたときに警告を出し、衛星が姿勢を大きく変更するときに適切な回転経路を提案できる。
  - スタートラッカーを気球や成層圏プラットフォーム、航空機に搭載する用途も考えられる。これらへの展開を考える際には耐水性や防水性についての考慮も必要となるだろう。また大気中のレイリー散乱等の影響による背景照度の上昇により、恒星検出に係る限界等級の低下が問題になるだろう。背景照度の上昇の小さな波長帯域での観測による姿勢決定が求められる。
- **技術情報の開示ルールの検討**
  - 国産スタートラッカーを我が国固有の知的財産として最大限活用するには、ハードウェア情報あるいはソフトウェア情報をユーザーに開放することが重要となる。その結果、新たな技術的創造性がそこに追加される。しかし、国家としての安全保障上、あるいは他者に対する優位性維持の観点から、それらを無制限に行うことはできない。法令等との関係も考慮しながら、かつ、情報管理の専門家の知見も取り入れながら、技術情報開示ルールについて検討した。この結果は、取扱説明書あるいは技術資料の作成作業などに反映した。

実施成果の詳細

②：高性能化（1ページ目 / 3ページ中）

「高性能化」とはスタートラッカーに実装された各機能の性能の程度を向上させることをいう。

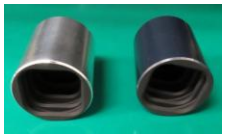
- **スタートラッカー搭載の恒星カタログの改良**
  - 天文学および天体観測学の知識を活かし、スタートラッカーが軌道上で参照する恒星カタログを、より精査、洗練されたものへと改良した。具体的には、大気吸収、光学系の分光透過率特性、センサの分光感度特性を考慮して、衛星軌道上での使用に最適化された恒星カタログを作成した。7 等級までの天体座標カタログデータ整備の一環として、紫外線域にも対応する恒星カタログを独自に作成した。具体的には、星のタイプ、カラー、星間吸収（Av）から、恒星の放射モデルと吸収量を計算してNUV バンドに外挿したカタログを作成した。更に、この開発過程で、Tracking アルゴリズムの改良にも成功した（評価関数の重み付け方法を変更した）。この改修により、初期姿勢の許容誤差を大きくでき、その状態からの姿勢推定精度を高めることに成功した。
- **取得画像と恒星カタログのマッチングアルゴリズムの改良**
  - 開発中のスタートラッカーは、恒星カタログと撮像情報との突合せ（以下、「カタログマッチング」）に複数回にわたる浮動小数点演算を実行しており、その計算量は姿勢決定処理全体の3 割にもおよび、画像処理系における消費電力の増加や発熱量の増加につながっている。上記事情に鑑み、カタログマッチング処理の堅牢性を維持しながら計算処理量を軽減する方法について複数検討したが、それらの中でカタログマッチング処理は現行の方法を維持したまま、参照するカタログの領域を適切に抽出することを主眼とする計算量削減手法の有効性が確認された。当該アルゴリズムは、旧来の方法に対して、カタログマッチングの実行時間を90%削減できる。この成果はSTT 実機での、その他の計算処理時間全体を分母とした場合でも 28%の削減効果として評価され、その結果、軌道上で動作を続けるスタートラッカーの消費電力についても概ね28%削減できたことに相当する、顕著な成果であるといえる。

実施成果の詳細

②：高性能化（2ページ目 / 3ページ中）

「高性能化」とはスタートラッカーに実装された各機能の性能の程度を向上させることをいう。

- **撮像素子及びFPGA まわりの冷却（＝排熱）**
  - 熱試験を精緻化し、その結果から撮像素子まわりの排熱設計を見直すことにより、撮像素子の温度を下げることに成功した。この効果として撮像素子の熱的暗電流を低減に成功し、撮像素子中のホットピクセルが星像と恒星カタログとのマッチングに与える悪影響を減ずることができた。
- **消費電力削減**
  - スタートラッカー全体でみると、撮像センサや通信系と比較して、演算プロセッサおよびRAMの消費電力が多い。この部分に着目して主に計算負荷の最小化を図った結果、0.5Wの電力削減の見通しを立てることができた。
- **太陽回避角・地球回避角の縮小Ⅰ：迷光を極小化するための特殊なバッフル/光学系の開発**
  - 星像を安定して捕捉するためには、太陽光や地球光、視野外の明るい恒星から検出器に届く迷光を極小化することが肝要である。小型衛星用スタートラッカーとしてはすでに世界トップレベルの迷光除去性能を有しているが、更なる改善を図った結果として、衛星質量や予算規模に応じて最適なコスト対性能のトレードオフが可能となる目途を付けることができた。



改良したバッフル外観

- **太陽回避角・地球回避角の縮小Ⅱ：迷光発生パターンを考慮した、恒星マッチングアルゴリズムの実装**
  - すでに開発済みのアルゴリズムでも、宇宙軌道上で満月全体が視野中に入っているような悪条件下でさえスタートラッカーが姿勢を確定し続けられることが検証できている。しかし、より放射立体角が大きく光度の大きな地球がスタートラッカーの視野に近づいた際の天体検出能にはさらなる改良の余地があった。地球回避角を小さくすることが可能な解析アルゴリズムの開発を実施し、従来アルゴリズムとの比較において有意な改良を実現できた。

実施成果の詳細

②：高性能化（3ページ目 / 3ページ中）

「高性能化」とはスタートラッカーに実装された各機能の性能の程度を向上させることをいう。

- **光学レンズの長焦点化**
  - 衛星の設計、運用を柔軟にし観測プラットフォームとしての価値を高めるため、指向方向決定精度の向上ならびに太陽回避角、地球回避角の縮小を意図した狭視野化、すなわちスタートラッカー光学系の長焦点化を行った。その際の制約条件として、従来のスタートラッカー光学系と同等確率で姿勢喪失状態から姿勢決定できることに留意した。その結果は次のとおり。
    - Throughput ratio の比較 ⇒ ±1%と良好
    - ピーク輝度の比較 ⇒ 光軸上との比較で視野周辺にて70%以上を確保できており良好
    - PSFサイズの比較 ⇒ 視野全域で良好
    - 星像の非対称性 ⇒ 非点収差の大幅な改善に成功、きわめて良好
- **CubeSat への適合性向上**
  - スタートラッカーの全長を100mm程度に収めることに成功し、実装寸法に制約があるCubeSatへの搭載対応性が向上した。
  - 耐振動性、耐衝撃性を劇的に向上。鏡筒に直結する基板ケースの質量を大幅に軽量化し、機械的共振点を確実に2kHz とすることが可能となった。その結果、例えば60Grms加振でも性能に影響しないスタートラッカーを実現できた。



スタートラッカーの小型化に資する
試作ハーネスを含む動作試験構

  - FPGAの排熱が容易となり、スタートラッカーの適用環境温度範囲を拡大できた。
  - シグナルとケースのグランドを接続する方法や絶縁する方法の選択性が向上した。

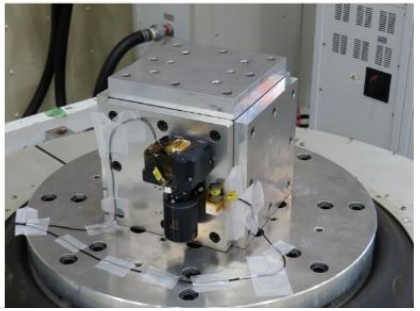
実施成果の詳細

③：高信頼化（1ページ目 / 4ページ中）

「高信頼化」とは、STT に実装された各機能が軌道上でトラブルを発生することなく、
所定の性能を確からしく発揮し続けられる様に整えることをいう。

- **放射線耐性の向上**
  - 検出器へのガンマ線やプロトンビーム照射実験、そして軌道上で2021年11月から運用している
    スタートラッカーで取得したデータを用いて、軌道上のいかなる要件が、バッドピクセルの増加につながるのかを解明し、これを予測するための物理数学モデルの構築に成功した。このことにより、スタートラッカーの
    設計寿命について、定量的な根拠をもって推定できるようになった。

- **衝撃試験、振動試験評価**
  - 衛星搭載品として必要不可欠である衝撃試験と振動試験を実施した。
    従来は搭載を想定した衛星の試験レベルに合わせたスペックでの試験のみを
    実施していたが、様々な機械環境を要求する宇宙機器へ広く採用可能な
    性能であることを検証すべく、より高いレベルでの試験を実施した。量産体制へ
    移行後においても、ワークマンシップの検証（組立工程を含むヒューマンエラー
    無き事の確認）のため、出荷検査として受入試験レベルでの試験を実施する
    ことを標準工程とすべきと考えられる。これら試験を含めて本製品を遅滞なく
    継続的に供給するため、安定して性能評価できる検査体制を整えた。

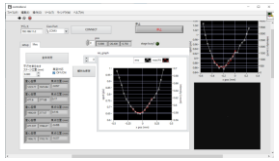


試験実施時の様子

- **自動アライメントシステムの製作**
  - スタートラッカーは対物レンズが検出器面に形成する光学像を電子情報
    処理することによって機能する。したがって、対物レンズが作る光学像面と
    光検出器面の幾何的位置を整えることが、スタートラッカーの機能・性能の
    実現において極めて重要である。この作業をクラフトマンシップによらず、
    安定かつ極めて短時間に実現するためのシステムの構築に成功した。



アライメント用治具



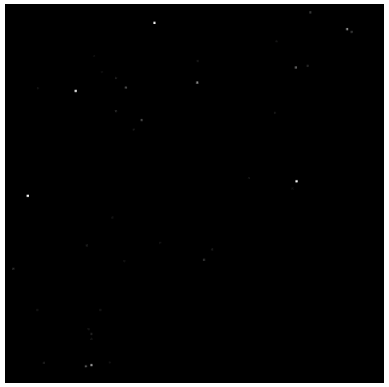
アライメント用ソフトウェア

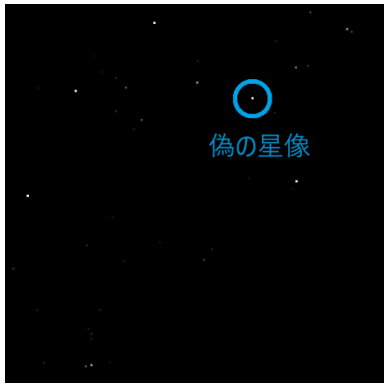
実施成果の詳細

③：高信頼化（2ページ目 / 4ページ中）

「高信頼化」とは、STT に実装された各機能が軌道上でトラブルを発生することなく、
所定の性能を確からしく発揮し続けられる様に整えることをいう。

- **恒星シミュレータの製作、性能評価**
  - 恒星シミュレータとは宇宙環境での天空状態を模擬可能な、スタートラッカーに恒星の情報を投射するシステムである。このシミュレータは、恒星カタログに登録された恒星の宇宙軌道上における光度や、スペクトルタイプを反映可能としている。
  - HiLSエミュレータなど上位の装置から姿勢を入力し、衛星姿勢に対応した疑似星画像をリアルタイムにスタートラッカーへ投影する機能も実装した。現実に酷似した宇宙環境下の光学状態を再現するために、突発天体や移動物体、迷光を模擬する機能を追加した。また、迷光を含む模擬的な背景光画像を表示し、疑似星画像と重ね合わせられるようにした。
  - この恒星シミュレータをスタートラッカーのフライトモデルの評価試験に供することで、屋外の天候によらず、清浄な環境下で宇宙環境と同等の光学条件のもとでスタートラッカーの品位を検定できるようになった。







恒星シミュレータソフトウェアで表示した疑似星画像を拡大した例。
（ 左図：恒星カタログ上の星像のみ　　中央図：偽の星像あり　　右図：背景光あり ）



プロジェクタの実機外観

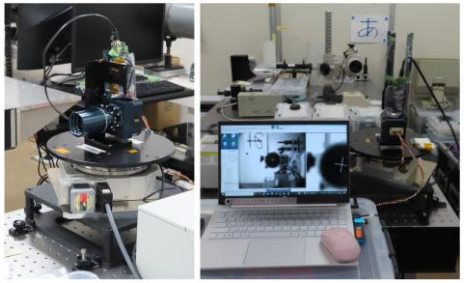
実施成果の詳細

③：高信頼化（3ページ目 / 4ページ中）

「高信頼化」とは、STT に実装された各機能が軌道上でトラブルを発生することなく、
所定の性能を確からしく発揮し続けられる様に整えることをいう。

- **太陽シミュレータの製作、性能評価**
  - スタートラッカーの基本的かつ重要な性能指標のひとつに太陽回避角がある。この指標の値が小さいほど、スタートラッカーの視野直近まで太陽が近づいたとしても、スタートラッカーは恒星を捕捉し続けることができる。よって、この性能が高いスタートラッカーを搭載した衛星ほど、衛星本体の姿勢自由度を向上することが可能となる。この性能はさらなる向上が期待できるが、事業実施者の試験設備の現状は、定量性及びトレーザビリティの観点で改善の余地がある。そこで、小型スタートラッカーの試験に適合する太陽シミュレータを製作し、太陽回避角の試験・評価を、低コストで簡便、確実に自動実施できるように整えることを試みた。太陽シミュレータの有意な運用には、これら環境に対するいっそうの整備が求められることが確認された。

- **歪曲収差の実測検証**
  - 歪曲収差の評価系として、直交2軸の精密回転ステージと専用ソフトウェアからなるシステムを新規に構築し、必要となる治具を設計、製作した。
  - この試験系により、スタートラッカーの各個体の出荷時ディストーションを定量的に評価可能となった。



ディストーション評価試験時の様子

実施成果の詳細

③：高信頼化（4ページ目 / 4ページ中）

「高信頼化」とは、STT に実装された各機能が軌道上でトラブルを発生することなく、
所定の性能を確からしく発揮し続けられる様に整えることをいう。

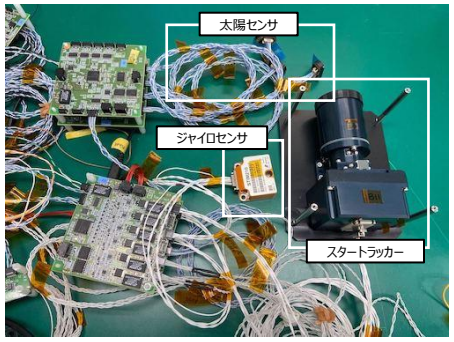
- **実用レベルのSiLSエミュレータの開発**
  - 衛星本体の制御ソフトウェアの開発が実機製作の段階に移行するとき、
    スタートラッカー本体が手元になくとも、宇宙軌道上の実機と同様のノイズ込みの
    信号を生成可能なソフトウェア機能体があれば、これを用いて姿勢系アルゴリズムの
    原理検証実験（SiLS：Software in Loop Simulation）を実施可能となる。
    このソフトウェア機能体を、SiLSエミュレータという。



通信実験実施時の様子

  - SiLS エミュレータを製作し、これを自らの衛星開発プロセスに適用することで、SiLSエミュレータの完成度が実用レベルにあることを検証し、スタートラッカーのユーザー及びポテンシャルユーザーに提供できるように整えた。

- **実用レベルのHiLS エミュレータの開発**
  - 衛星の実機開発段階では衛星側ハードウェアに対して、実際の環境を模した計測エラー込みのスタートラッカーからの出力を直接印加する試験（HiLS：Hardware in Loop Simulation）を実行することになる。
    スタートラッカーの本体と恒星シミュレータの組み合わせを設備し、
    その出力を使ってHiLS処理を実行できるような環境を全てのユーザーが
    備えるのは経済的に現実的とは言えないところ、スタートラッカーに代わって
    これを実現する信号生成回路（HiLS エミュレータ）があれば、
    衛星開発者にとっては、スタートラッカー本体の入手とは独立して、
    先行して電気的インターフェイスの成立性を確認できることとなる。
    事業実施者は、SiLSエミュレータと同様にHiLSエミュレータも開発し、
    これを衛星開発者に供給できるよう整えた。



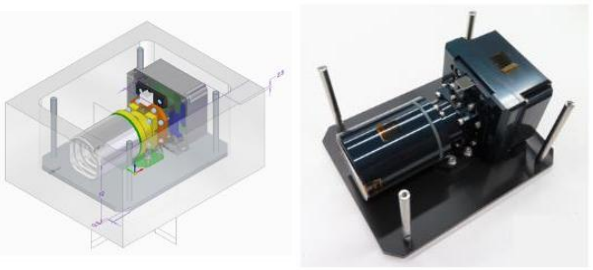
スタートラッカー、太陽センサ、3軸ジャイロと基板の接続図

実施成果の詳細

④：安定供給できる技術体系、体制の確立

安定供給できる技術体系および体制については、いわゆるプロセスアプローチと呼ばれる管理技法を採用することとする。本事業の成果を反映した量産品の製造は株式会社ジェネシアが担当することとする。ジェネシアはスタートラッカーに求められる品位を満たす工程設計を行い、これをジェネシアがISO-9001に準拠する仕組みで実装する。

- **専用梱包ケースの整備**
  - 従前の梱包ケースの試作品初号機は、使い勝手や輸送上の安全対策において一定の水準に達しているとの評価を、コンソーシアム内において得ていた。しかし、同試作品に用いていた市販ケースが廃番となることが確認されたため、長期的な調達安定性に優れる別の市販ケースを選定した。
    これに対応する中子（スタートラッカーを直接搭載し、ケース内に収める治具部品）の設計を行った。バッフル改修による形状変更が確定しなかったため、事業期間内に製造までは実施していないが、スタートラッカーの形状に合わせ速やかに製造に移る準備を整えることができた。



専用梱包ケースの設計結果

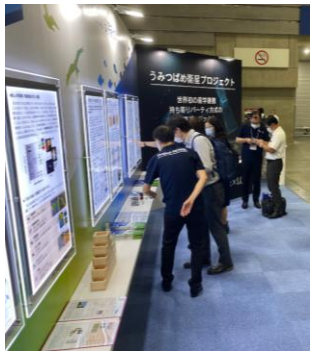
- **取扱説明書、ドキュメント類の整備**
  - 取扱説明書およびドキュメント類を整備した。取扱説明書には記載し切れない動作モード等の詳細をまとめた別添資料を整備し、更新ファームウェアの内容も反映した。

- **安定供給体制の確立**
  - 安定供給できる技術体系及び体制の確立を意図し、部品の長期的安定調達可能性について調べたところ、搭載IC部品の一部が廃番であることが分かった。これを受けて、互換部品を調達し、当該部品を実装した基板の動作確認を行った。結果、少なくとも室温大気圧下のもとでは正常動作することまでは事業期間内に確認できた。事業終了後、真空中での連続動作（温度が上昇していく）に問題が無いことについても確認した。

実施成果の詳細

⑤：低コスト化への取り組み

- **市場調査および情報展開、売り込みの強化**
  - 宇宙軌道上実績の積み上げ並びに製造数の増加による単価の圧縮のために、国内外の展示会や学会（Small Satellite Conference や OPIE等）でスタートラッカーの完成品展示を含む積極的な情報展開や講演、発表を実施。企業や大学、研究開発機関等とスタートラッカーの衛星搭載に向けて協議を実施している。例えば欧州では、ハンガリーやイギリスの人工衛星製造業者と、同社開発の人工衛星へのスタートラッカー搭載に向けて具体的に協議実施。
  - スタートラッカーのアプリケーション拡大に向けて、スタートラッカーを軌道上での姿勢決定デバイスとして使用するのみならず、これを突発天体やデブリ、その他の突発的光源などの検知デバイスとして機能させることについて検討実施。
    また複数組織とスタートラッカーの活用にむけて協議実施。



展示会での意見交換活動の様子

- **製造コスト低減への取り組み**
  - 製造コストの低減のため、非球面レンズのプレス加工に取り組んだ。非球面レンズプレス品の製造が完了し、これを光学系に組み込んだ性能評価試験を実施した結果、非球面レンズをプレス加工品に置き換えられることが確認できた。このことと、製造工程（検査工程）の省力化に目途がついたことから、エンドユーザ渡し価格をかつてのスタートラッカーとの価格比で最大20%程度低減可能なコスト競争力を得られた。
    ただし実際の販売価格については、相手方が商業用または大学等の研究用途であるのかという対象別、あるいは契約数量、国内外向けの別等の要素を踏まえて慎重に決定していく必要があるとの認識である。
  - ユーザーサポート負荷の低減については、十分な検証を行えていない。それは今のところ、対象ポテンシャルユーザーの技術的水準が高く、当然にやりとりをすべき必要最小限のやりとりで、業務を遂行できてしまっているからである。しかしながら今後、商業ベースその他で、スタートラッカーについての知見に薄いユーザー層が増加するとともに、サポート負荷の増加が予想される。関与負荷の低減については引きつづき検討していくこととする。

実施成果のサマリ（1ページ目/2ページ中）

本委託事業の実施者は本事業にて、スタートラッカーについて以下のとおり実施した。

① 多機能化	実施状況
1-1）アライメントキューブの開発	**当初予定通り完了**
1-2）画像出力機能及び突発天体等の座標出力機能	
1-3）ジャイロセンサの情報、衛星の高速旋回情報との連動	
1-4）発展型STTに求められる機能要素に関する概念検討	
1-5）技術情報の開示ルールの検討	

② 高性能化	実施状況
2-1）恒星カタログの改良	**当初予定通り完了 （さらなる改良を現在も継続中）**
2-2）マッチングアルゴリズムの改良	
2-3）撮像素子とFPGAの冷却	
2-4）消費電力削減	
2-5）太陽離隔・地球離隔の縮小Ⅰ 特殊なバッフルの開発	
2-6）太陽離隔・地球離隔の縮小Ⅱ 改良型アルゴリズムの開発	
2-7）光学レンズの長焦点化	
2-8）CubeSatへの適合性向上	

実施成果のサマリ（2ページ目/2ページ中）

本委託事業の実施者は本事業にて、スタートラッカーについて以下のとおり実施した。

③ 高信頼化	実施状況
3-1）放射線耐性の向上	**当初予定通り完了**
3-2）衝撃試験、振動試験評価	
3-3）自動アライメントシステムの製作	
3-4）恒星シミュレータの製作、性能評価	
3-5）太陽シミュレータの製作、性能評価	
3-6）歪曲収差の実測検証	
3-7）SiLSエミュレータの開発	
3-8）HiLSエミュレータの開発	

④ 安定供給できる技術体系、体制の確立	達成状況
4-1）専用梱包ケースの整備	**当初予定通り完了**
4-2）取扱説明書、ドキュメント類の整備	

⑤ 低コスト化への取組み	達成状況
5-1）市場調査および情報展開、売り込みの強化	**当初予定通り完了 （現在も継続して取り組み中）**
5-2）製造コスト低減への取り組み	

成果競合ベンチマークとの比較

- 従来であれば大型衛星に求められるような高度な機能や性能が小型衛星に求められるようになってきている。これを実現するためには、高い姿勢制御要求の実現手段を確立することが重要である。衛星の小型化に伴いスタートラッカー自体も小型化が求められるようになってきているが、**スタートラッカーのサイズは姿勢決定能力とトレードオフ**の関係にある。本事業で開発したスタートラッカーは**超小型衛星用スタートラッカーにおいて世界最高レベルに並ぶ性能**を有している。

他のスタートラッカーとの性能比較

Manufacturer	Mass(kg)	Power (W)	Cross axis Accuracy(3σ)	Twist Accuracy(3σ)
本事業開発品	**0.46**	**2**	**6"**	**60"**
Berlin Space Technologies社製	0.27	0.75	15"	150"
Blue Canyon Technologies社製	1.30	1.5	6"	40"
Sodern社製	0.23	0.8	10"	70"

- 本事業の実施者である株式会社ジェネシアは、自社で開発したスタートラッカーがJAXA革新2号機による打ち上げの**「ひばり」衛星に搭載**、また本事業で開発したスタートラッカーが革新3号機による打ち上げの**「うみつばめ」衛星に搭載**され、軌道上における実証に成功している。軌道上で異常なく機能し続けており、**軌道上での実績を積み上げている**。

- スタートラッカーと他の衛星姿勢系要素（ジャイロセンサなど）との連動性を向上させて一体運用できるようにすれば、マヌーバ中の姿勢決定不備を回避しやすくなる一方、このような技術トレンドは現状見当たらない。スタートラッカーの性能向上のみならず、新規に開発した小型のフードを搭載することによるスタートラッカー性能の劣化防止や衛星実装の簡便化、独自に改良を重ねる星像検出アルゴリズムによる宇宙軌道上における姿勢情報出力の確実性向上、優位性さらに高めるためのジャイロセンサ等との機能連動の付与、量産化に向けた体制構築検討等により、**国際競争力を持つ高性能・低価格なスタートラッカーの開発について、現在も継続して推進**している。

今後の取り組みの方向

スタートラッカー技術のSSA領域等への展開：宇宙軌道上からの、デブリ等の移動物体の精緻な検知

宇宙軌道上にあるスタートラッカーは頻繁に視野内にデブリ等を写し込む。本事業で開発のスタートラッカーはその物体方向を、スタートラッカーが同視野に捉えた恒星の配置座標を基準に特定する機能を有している。スタートラッカーには自己位置や時刻を把握する機能も有しており、**当該デブリ等の空間位置の決定を行える。**

「スタートラッカーを搭載している衛星」も「デブリ」も、それぞれが飛行する軌道の相互関係上、スタートラッカーは繰り返し同一のデブリ等を異なる位置や方向から観測することになる。それら毎回の観測結果を突き合わせることで、**スタートラッカーを搭載する衛星と、検知された任意のデブリ等までの距離や相対速度の予測をできる**ようになり、結果として、**軌道上の衝突回避予報を発する**ことができるようになる。

日本ではJAXAが地上に設備した望遠鏡で 10 cmサイズまでのデブリの存在検知についてレポートしており、その軌道を追跡、予測している（Iwaki,A., Yanagisawa,T. et al., ）。宇宙軌道上に配備されたスタートラッカーを用いてデブリ等を計測する、いわゆる「**スタートラッカーベースのSSA（Space Situational Awareness：宇宙状況把握）**」は、スタートラッカーが元来有する “測量機能” を発揮し、地球大気の影響を受けずにデブリ等の位置や色、（近距離であれば形）まで含めて精緻に検知し、それらのカタログ化を図ることができると期待される。また、スタートラッカーをSSA分野に特化させ、複数の衛星に専用の光学系と軌道上処理部を用意すれば、観測対象の位置や属性を、リアルタイムで検知できるようになると期待できる。

スタートラッカーの**画像検知能力を赤外波長域にまで広げる**と、可視域では昼間の空は太陽光の大気散乱によって明るく、恒星の検出が困難であったとしても、赤外線領域での観測では波長帯を適切に選択することで大気散乱の影響を低減し、昼間の空でも恒星を捉えられるようになる。また、観測対象物が高温を呈する場合には、対象物に太陽光などからの照明がなくとも、その存在を検知できることとなると見込まれる。